

**LA INFLUENCIA DE LAS CENIZAS VOLANTES COMO SUSTITUTO
PARCIAL DEL CEMENTO PÓRTLAND EN LA DURABILIDAD DEL HORMIGÓN:
PROPIEDADES FÍSICAS, DIFUSIÓN DEL IÓN CLORURO Y DEL DIÓXIDO DE CARBONO**

O. I. Molina Bas, A. Moragues Terrades y J. C. Gálvez Ruiz

Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos,
Universidad Politécnica de Madrid, Calle del Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid, España
E-mail: omolina@caminos.upm.es, amoragues@caminos.upm.es y jcgálvez@caminos.upm.es

RESUMEN

La durabilidad del hormigón, está influenciada por la capacidad de transporte de los fluidos en su red porosa. El uso de cenizas volantes en hormigón está extendido por el ahorro económico que supone y los cambios micro-estructurales motivados por la adición. Existe consenso en que las cenizas reducen el tamaño de poro. Aunque, los cambios de composición y micro-estructurales en la durabilidad del material no están completamente claros. En el XXIV Encuentro se presentó un estudio sobre cómo afectaban las cenizas a la permeabilidad y a la estructura porosa. Este trabajo complementa el anterior, extendiendo el estudio a los resultados de los ensayos de carbonatación y difusión de cloruros. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que las cenizas no modifican del mismo modo la carbonatación y la difusión de cloruros. La difusión de cloruros se ve más afectada por los cambios de la estructura porosa. Los iones carbonato interaccionan químicamente con la matriz por lo que su avance se ve afectado por los cambios en composición generados por la reacción pozzolánica.

ABSTRACT

Concrete durability is influenced by the transport capacity of the fluids in its porous network. The use of fly ash in concrete is extended due to the economic savings, and the micro-structural changes motivated by the addition. Most agree on the effectiveness of the ashes to reduce pore size. Nevertheless both composition and micro-structural changes are not entirely clear in terms of durability. A study on how the ash affects concrete's permeability and porous structure was presented at the XXIV Conference. The current work complements the previous one, including chloride diffusion and accelerated carbonation tests. The results show that the ashes modify these diffusion processes differently. The chloride diffusion is more sensible to changes in the porous structure. Carbonate ions, however, interact chemically with the concrete matrix, thus its progress is affected by changes in composition due to the pozzolanic reaction.

PALABRAS CLAVE: Hormigón, Durabilidad, Cenizas Volantes, Cloruros y Carbonatación.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se han realizado esfuerzos para mejorar la calidad y durabilidad de los hormigones. Es conocido [1, 2] que las puzolanas pueden contribuir a mejorar las características del hormigón. Entre estas se destaca el refinamiento de la estructura porosa del material. Además, las cenizas volantes ofrecen un impacto positivo como sustituto parcial del cemento portland. La reducción de la dosis de cemento en las mezclas de hormigón abarata los costes del material, disminuye la contaminación asociada a la producción de cemento y ayuda a solucionar el problema de eliminación de las cenizas.

Desde un punto de vista económico, la vida útil de las infraestructuras se encuentra limitada por el deterioro de los materiales de construcción. En el año 2002, EE.UU. estimó que los costes de corrosión en sus infraestructuras ascienden a los 22,6 mil millones de dólares anuales [3] y se prevé que esa cantidad aumente a razón de \$500 millones anuales [4].

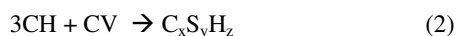
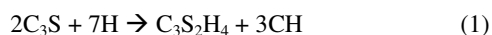
La Instrucción Española de Hormigón Estructural (EHE-98) define la durabilidad de una estructura de hormigón y su armadura como “su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta”. La penetración del agua y de las sustancias disueltas en ésta, pueden causar el deterioro del hormigón armado. Al igual que la difusión del dióxido de carbono y los iones de cloruro provocan la degradación acelerada del material. La durabilidad de un hormigón dependerá en gran medida de la capacidad del mismo para resistir estos ataques.

El *Comité Euro-International du Béton* (CEB) señala que la mayoría de los procesos químicos y físicos que influyen en la durabilidad de las estructuras de hormigón, están condicionados por el transporte a través de los poros y las grietas. La estructura de poros se puede clasificar por su tamaño y distribución. Según la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC por sus siglas en inglés) los poros se clasifican

en: *micro-poros* ($\phi < 2$ nm), *meso-poros* ($2 \text{ nm} < \phi < 50$ nm) y *macro-poros* ($\phi > 50$ nm). Los que suelen afectar a la durabilidad son los *meso-poros* y los *macro-poros*, especialmente en el caso de poros interconectados y porosidad abierta, lo que facilita el transporte de sustancias solubles en líquidos o gases.

1.1 Hidratación del hormigón con cenizas volantes

En los hormigones con adición de cenizas volantes ocurren dos reacciones principales. En la primera se produce gel C-S-H ($\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_4$) y Portlandita (hidróxido cálcico) por la hidratación del cemento Portland, ecuación (1). En la segunda, la Portlandita se combina con las cenizas volantes (CV) para formar nuevos geles de C-S-H, ecuación (2). El resultado suele traducirse en un hormigón de mejores propiedades físicas y mecánicas.



La variedad de composición química y propiedades físicas de las cenizas volantes hace difícil predecir de forma general la modificación de las características del hormigón. Por esta razón, el Instituto Americano del Hormigón (ACI por sus siglas en inglés) en su *Guía para Hormigones Duraderos* recomienda el análisis de las cenizas volantes y la realización de ensayos de caracterización del hormigón con adición de cenizas.

En la actualidad la incorporación de cenizas está condicionada por el tipo de cemento disponible en el mercado, en vez de condicionar el tipo de cemento a las cenizas disponibles. Esto resulta en especificaciones diseñadas para que las cenizas se ajusten a los cementos que están disponibles en el mercado. Para explotar adecuadamente las cenizas volantes que provee la industria, el cemento debería ser formulado para optimizar la actuación de la combinación en términos de consistencia, resistencia y durabilidad de los hormigones [5].

Es evidente la necesidad de más investigaciones que exploren el alcance real de las cenizas volantes en la construcción. La influencia de la composición y propiedades físicas de los cemento en la durabilidad de los hormigones con cenizas no está bien definida.

1.2 Objetivos

El objetivo del presente trabajo de investigación, es estudiar la influencia de las cenizas volantes, como sustituto parcial del cemento Portland en la durabilidad del hormigón, dentro de los límites de cantidad de ceniza admitidos por la normativa. Para lograr estos objetivos se realizan ensayos de caracterización: resistencia a compresión y porosimetría por intrusión de mercurio (MIP por sus siglas en inglés). Además, se

estudia la resistencia del hormigón con cenizas a la penetración del CO_2 y del ión cloruro.

2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

2.1. Materiales empleados

EHE-98 especifica que los hormigones con adición de cenizas volantes tienen que fabricarse exclusivamente con cemento CEM I. En este trabajo se ha adoptado cemento CEM I 42.5 R. Se han seleccionado dos cementos con diferentes relaciones de $\text{C}_3\text{S}/\text{C}_2\text{S}$: el primero alcanza la clase resistente por finura de molido, al cual denominamos *F*, y el segundo por su composición, le nombramos *G*.

Los áridos empleados son de naturaleza silícea y de la misma fuente de procedencia. Los gruesos, con un diámetro máximo de 20 mm, proceden de machaqueo y su módulo granulométrico es de 7,08. La arena poseía un módulo granulométrico de 2,86 y un equivalente de arena de 76%.

Las cenizas volantes empleadas son de naturaleza silícea y de bajo contenido en óxido de calcio, clasificadas como tipo V de acuerdo a la Instrucción para la Recepción de Cementos (RC-03). Además cumplen con las especificaciones de UNE EN 450, para su empleo como adición al hormigón. Proceden de la central térmica de Andorra (Teruel, España). En la Tabla 1 se presenta la composición química de las cenizas volantes utilizadas y la Tabla 2 muestra mineralogía inferida teóricamente por medio del método de Bogue, UNE 80304:2006.

Tabla 1. Composición química de las cenizas volantes

Compuesto	Cenizas Volantes	Norma
Al_2O_3	30.02	UNE 80230
Fe_2O_3	19.93	UNE 80230
CaO	8.09	UNE 80230
SiO_2	40.56	UNE 196-2

Tabla 2. Composición mineralógica de los cementos

Componente	Holcim (F)	Cemex (G)
C_3S	56,06	65,13
C_2S	17,56	5,84
C_3A	9,84	12,12
C_4AF	7,51	8,24

2.2. Dosificaciones

La dosificación de los áridos se hizo por el método de Bolomey. Se empleó 350 kg de cemento por m^3 de hormigón y una relación agua/cemento de 0,65. En las dosificaciones del hormigón con adición de cenizas volantes se siguieron las recomendaciones de UNE 83414:1990 EX. Además, siguiendo la EHE-98 (art. 37.3.2), *Limitaciones a los contenidos de agua y de*

cemento para cementos con adiciones, el contenido de cemento, c , es sustituido por $c + KF$, donde K es el coeficiente de eficacia de las cenizas volantes, y F el contenido de la adición. Así la relación de agua/cemento (a/c) es sustituida por $a/(c + KF)$.

La Tabla 3 presenta las cantidades empleadas de cada material en las dosificaciones. Como coeficiente de eficacia de las cenizas se ha adoptado $K = 0,30$.

Tabla 3. Dosificaciones por m^3 de hormigón

Ceniza / Cemento	Cemento (kg)	Cenizas (kg)	Arena (kg)	Grava (kg)
0,00	350,0	00,0	918,0	780,0
0,15	334,9	52,2	878,5	780,0
0,35	316,7	110,9	830,6	780,0

2.3. Fabricación de las probetas

El hormigón se amasó en una amasadora planetaria de eje vertical de 100 litros de capacidad. Las probetas se confeccionaron en amasadas de 95 litros, obteniéndose de cada amasada 16 probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura y 6 probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura. El proceso de amasado y curado siguió las recomendaciones de ASTM C 192.

2.4. Ensayos realizados

La Tabla 4 enumera los ensayos realizados y la edad de las probetas a la fecha de ensayo.

Tabla 4. Ensayos realizados

Ensayo	Tiempo (días)		Normas
	28	91	
Resistencia a compresión de probetas	X	X	UNE-EN 12390-3:2003
Profundidad de carbonatación	--	X	UNE 112011:1994
Penetración de cloruros	--	X	ASTM C1543-02
Porosimetría por intrusión de mercurio	--	X	----

La determinación de la resistencia a compresión de probetas se realizó según la UNE-EN 12390-3:2003. Del mismo modo, la porosidad de las muestras se midió con un porosímetro de intrusión de mercurio. La técnica empleada está estandarizada por la ASTM D4404-84 (2004) para su utilización en suelos y rocas. En este estudio se empleó un porosímetro Micromeritics, modelo Autopore IV 9500, que opera hasta una presión de 33.000 psi (228 MPa), cubriendo un rango de diámetro de poro desde 0,006 a 175 μm . Para acondicionar cada muestra, se siguió un proceso de precalentamiento y desgasificación en el que la muestra se secaba a una temperatura de 40 °C hasta peso

constante y luego se desgasificaba con una bomba de vacío. La intrusión de mercurio fue gradual y para cada condición de equilibrio se mantuvo la presión durante 10 segundos. La cantidad de muestra empleada en cada medida fue de aproximadamente 3,5 gr. $\pm 0,3$ gr.

El ensayo de carbonatación acelerada se realizó en una cámara de carbonatación. Esta consta de un suministro de gas, un higrómetro, un termómetro y una sonda que monitoriza la concentración de CO_2 . Los ensayos se realizaron a los 91 días de curado, a 20 °C ± 2 °C y con una humedad relativa de 95% $\pm 5\%$, las probetas que se emplearon fueron cilíndricas de 100 $\varnothing \times 200$ mm. En el interior de la cámara las muestras se expusieron por un periodo de 91 días a un ambiente de 4.7% $\pm 2.5\%$ de dióxido de carbono y la diferencia en nitrógeno. La humedad relativa se mantuvo en el 76% $\pm 4\%$ y la temperatura en 24 °C ± 4 °C.

La profundidad de carbonatación se midió según la norma UNE 112011:1994. La valoración se realizó cortando a cada una de las probetas una rodaja de 20 mm de espesor y aplicando en la superficie de expuesta una disolución indicadora de fenoltaleína. La misma probeta se utilizó varias veces para medir la progresión de la profundidad de carbonatación en función del tiempo. Las mediciones se realizaron cada 28 días, hasta alcanzar los 91 días.

Los ensayos para determinar la penetración del ión cloruro en el hormigón, se efectuaron siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C1543-02. Éstos se realizaron a los 91 días de curado, a 20 °C ± 2 °C y con una humedad relativa de 95% $\pm 5\%$, usando probetas cilíndricas de 100 $\varnothing \times 200$ mm. Transcurrido este periodo de tiempo se extrajeron dos piezas de hormigón de 10 mm de espesor mediante corte en húmedo de uno de los lados de la probeta. El fragmento exterior tuvo como función exponer el interior de la probeta y el segundo se mantuvo en la cámara de curado a modo de referencia.

El resto de las probetas se sumergieron en una solución saturada de agua destilada y $Ca(OH)_2$ en un recipiente cerrado hasta alcanzar peso constante, $\pm 0,1\%$ en masa, por un periodo de 24 horas. A continuación las probetas se secaron superficialmente y se cubrieron todas las áreas, a excepción de la cara de corte, con una resina epoxi impermeable, Sikafloor - 261. Se aplicaron varias capas hasta alcanzar 1 mm de espesor. La aplicación y posterior secado de la resina siguió las recomendaciones del fabricante de la misma. Superada la etapa, se sumergió la muestra nuevamente en la solución saturada de agua destilada y $Ca(OH)_2$ bajo las condiciones anteriormente descritas. Al finalizar la segunda etapa de saturación las probetas se sumergieron por un período de 91 días en una solución de agua destilada y NaCl al 3%. La concentración de la solución se mantuvo constante, mediante evaluaciones semanales en las que se realizaron los ajustes pertinentes.

Concluidos los 91 días de exposición se retiraron las probetas de la solución salina y comenzó la toma de muestras. En la extracción de las muestras se utilizó un taladro de columna al que se le incorporó una corona de polvo de diamante. Mediante el cual, se extrajeron las muestras del material en seco hasta alcanzar los 30 mm de profundidad. Las muestras se tomaron a intervalos de aproximadamente 5 mm, para obtener el perfil de penetración de cloruros. La última fase, la determinación de la concertación del ión cloruro, se realizó según la norma UNE 112010:1994. La titulación se realizó con una disolución de nitrato de plata (AgNO_3) 0,05 M. El equipo utilizado es un valorador potenciométrico con electrodo selectivo, modelo ML-50 de Mettler Toledo.

3. RESULTADOS

3.1. Resistencia a compresión

La Figura 1 muestra los resultados de resistencia a compresión para cada dosificación y cemento empleados. Los valores presentados corresponden al valor medio de 3 probetas ensayadas.

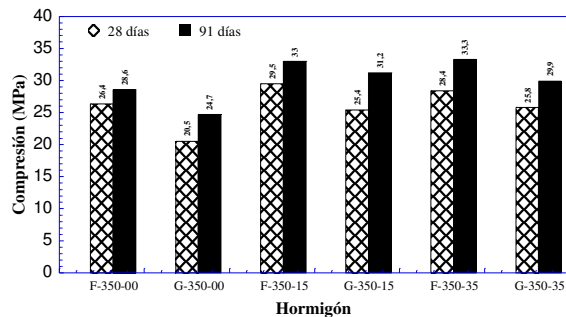


Figura 1. Resistencia a compresión

Los hormigones con cemento *F* proporcionan, a igualdad de condiciones, mayor resistencia a compresión que los hormigones con cemento *G*. Estas diferencias se presentan a todas las edades, para cada proporción de cenizas cemento. Además, se observa que la incorporación de cenizas en un 15 y un 35 por cien no varía significativamente la resistencia para un mismo tipo de cemento. Al mismo tiempo, se observa que los hormigones con cenizas volantes superan la resistencia del hormigón sin ceniza (*blanco* o referencia) a los 28 días, y en especial a los 91 días.

3.2. Penetración de dióxido de carbono

Las Figura 2 y 3 muestran los resultados de penetración de dióxido de carbono para cada dosificación y cemento empleados, a los 91 días de la fecha de amasado. Los valores presentados corresponden a las profundidades medias de penetración de las probetas ensayadas.

La Figura 2 presenta el resultado de las amasadas preparadas con 350 Kg por m^3 de hormigón de cemento

F. Se observa la penetración media de CO_2 y su evolución a través del tiempo. La figura muestra una tendencia en la cual el uso de las cenizas volantes varía la velocidad de penetración y desfavorece la difusión de dióxido de carbono en el hormigón a los 28 y 56 días. Igualmente se aprecia una tendencia en la que las cenizas favorecen la penetración de CO_2 a los 91 días.

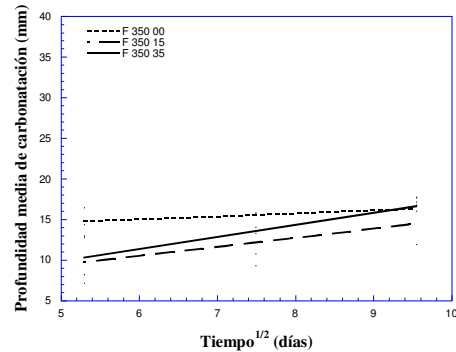


Figura 2. Carbonatación acelerada: cemento *F*

La Figura 3 presenta el resultado de las amasadas preparadas con 350 Kg de cemento *G* por m^3 de hormigón. Se observa la penetración media de CO_2 y su evolución a través del tiempo. Dicha figura revela una tendencia en la cual el uso de las cenizas volantes desfavorece la difusión de dióxido de carbono en el hormigón para todos los niveles de sustitución y a todas las edades estudiadas. Esta propensión, encuentra su óptimo en valores de sustitución cercanos al 15 %.

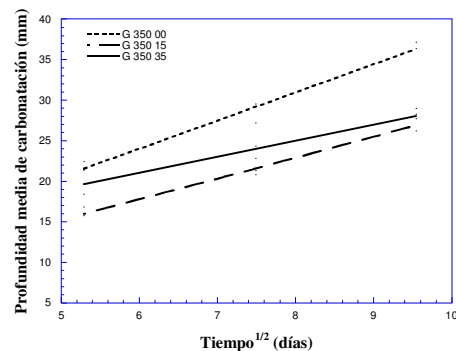


Figura 3. Carbonatación acelerada: cemento *G*

3.3. Penetración del ion cloruro

La Figura 4 muestra los resultados de penetración del ión cloruro para cada dosificación y cemento empleados, a los 91 días de la fecha de amasado. Los valores presentados corresponden a los coeficientes efectivos de transporte del Cl^- en las probetas ensayadas.

La Figura 4 presenta el resultado de las amasadas preparadas con 350 Kg por m^3 de hormigón de cemento *F* y *G*. La figura muestra una tendencia en la que al aumentar volumen de cenizas volantes se reduce la penetración del ión cloruro en el hormigón, para ambos

cementos. No obstante las curvas de ajuste muestran una variación en el comportamiento.

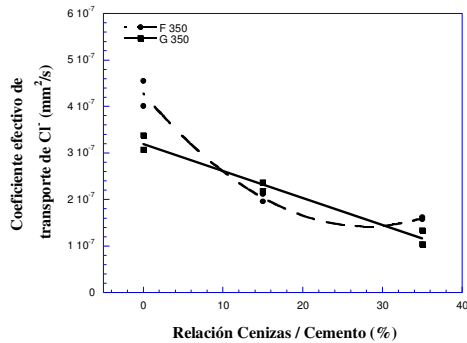


Figura 4. Penetración de iones de cloruro

3.4. Porosimetría por intrusión de mercurio

La Figura 5 presenta la resistencia a compresión y la porosidad total, medida por intrusión de mercurio, a los 91 días de amasado. Los hormigones con cemento *G* presentan una porosidad total mayor que los fabricados con cemento *F*. Se observa que una mayor porosidad lleva asociado disminuciones de resistencia.

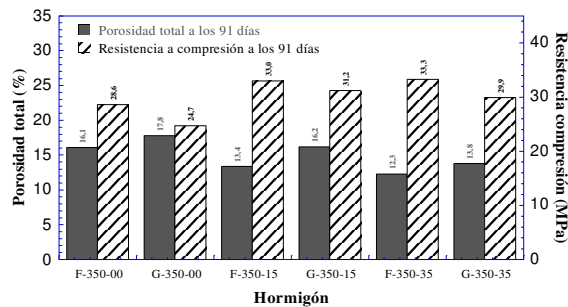


Figura 5. Resistencia a compresión y porosidad total

Las Figuras 6 y 7 muestran las curvas de intrusión de mercurio para los dos hormigones estudiados. Los hormigones con cemento *G* presentan un mayor volumen de *meso-poros* que los fabricados con cemento *F*. En el caso de los *macro-poros* ocurre lo opuesto, los hormigones con cemento *F* muestran una intrusión superior en los que se utilizó cemento *G*.

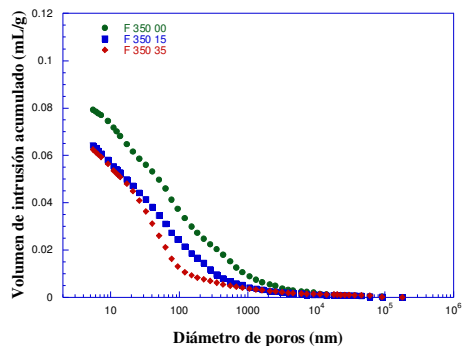


Figura 6. Distribución de poros: cemento *F*

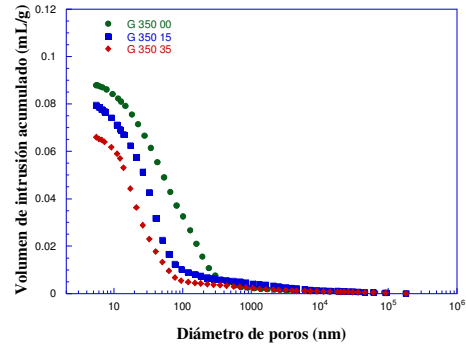


Figura 7. Distribución de poros: cemento *G*

4. DISCUSIÓN

Los ensayos realizados muestran claramente una mejora de la resistencia a compresión de los hormigones con adición de cenizas, a los 28 y 91 días, para los cementos estudiados. El aumento del contenido de cenizas del 15 al 35% no modifica significativamente el comportamiento mecánico de material.

En los ensayos de carbonatación acelerada los hormigones fabricados con cemento tipo *F* presentan valores nominales de penetración de CO₂ menores que los de hormigones confeccionados con cementos *G*. Los cambios que produce la adición de ceniza al avance del frente carbonatado varía por el tipo de cemento empleado.

Al comparar los hormigones con cenizas con sus referencias, los hormigones fabricados con el cemento tipo *F* muestran una menor penetración inicial de CO₂, que tiende a igualarse en el largo plazo. Mientras, que los hormigones fabricados con el cemento tipo *G* muestran una menor penetración de carbonatos a edades tempranas y esta se mantiene durante el período de estudio. El mejor comportamiento lo presentan en ambos casos los hormigones con una sustitución de un 15% de ceniza.

Al analizar los resultados es importante tener en cuenta la diferencia en la composición de los dos cementos. La relación C₃S/C₂S en el cemento *G* es tres veces mayor en el cemento *F*. La consecuencia directa es una mayor disponibilidad de portlandita. Cálculos estequiométricos muestran que la hidratación de C₃S produce cerca de 2,2 más hidróxido de calcio que la misma cantidad de C₂S [6]. Por lo que, es posible esperar una mayor disponibilidad de portlandita libre para reaccionar con el carbonato y consecuentemente un mayor retraso en el avance de la carbonatación. de estos cementos con las cenizas. El cemento tipo *F* por su finura determinará una más rápida reacción de puzolánica con la consecuente reducción de portlandita libre, lo que reducirá las posibilidades de reacción con los carbonatos [7].

Los resultados de penetración del ión cloruro muestran una tendencia a reducir el coeficiente de difusión de cloruros a medida que aumenta el contenido de cenizas. Las reducciones observadas son significativas en los dos cementos pero las curvas de tendencia de estas reducciones son visiblemente diferentes en ambos casos. Los hormigones con cemento *F* muestran una reducción muy significativa con una sustitución de ceniza del 15%, para mostrar muy poca modificación cuando aumenta la adición. Estos resultados son coherentes con los cambios que muestran las curvas de intrusión de mercurio, donde las diferencias más significativas se producen para ese cemento entre el 0 y el 15% de adición.

En los hormigones fabricados con el cemento tipo *G* la reducción del coeficiente es proporcional al contenido de ceniza y las diferencias encontradas entre el 0 y el 15% de adición son similares a las encontradas entre el 15 y el 35%. Al observar los cambios producidos en la curva de intrusión de mercurio para las mismas combinaciones de ceniza / cemento el comportamiento es similar.

La reducción de porosidad total en el hormigón, para cada cemento estudiado, con las distintas adiciones de ceniza conlleva un aumento de resistencia. Sin embargo tanto el valor de la porosidad total como el de la resistencia a compresión, muestran una tendencia a la estabilización a medida que se aumenta el contenido de ceniza. Este hecho es explicable si se admite una variación del factor de eficacia de la ceniza en función del porcentaje que se emplea. Valores moderados de adición parecen proporcionar mejores factores de eficacia por el mayor contacto entre las cenizas y los productos de hidratación del cemento, favoreciendo la reacción puzolánica de las cenizas. Una dosis elevada de cenizas parece obstaculizar el óptimo aprovechamiento de las mismas, porque impide el contacto entre la portlandita y las cenizas volantes, lo que disminuye su coeficiente de eficacia.

5. CONCLUSIONES

Los resultados presentados permiten mejorar la comprensión del comportamiento de los hormigones con cenizas volantes, como sustituto parcial del cemento Portland. De los resultados obtenidos se puede concluir que:

- Las cenizas volantes pueden contribuir a mejorar la resistencia a compresión a edades tan tempranas como los 28 días.
- La eficacia de la adición de ceniza frente a la penetración de carbonatos depende del contenido libre de portlandita. Siendo más efectiva la adición cuanto mayor sea el contenido de portlandita libre.
- La penetración del ión cloruro se reduce por el uso de cenizas volantes. La eficacia de la ceniza frente al

avance del cloruro esta asociada a las reducciones de porosidad producidas por la adición.

- El comportamiento de los hormigones con cenizas volantes varía en función de las características físicas y químicas de los cementos empleados, a pesar de que éstos estén catalogados bajo la misma designación de cementos comunes. En este trabajo se han empleado dos cementos CEM I 42,5 R.

AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan su agradecimiento al Prof. Manuel Fernández Cánovas y a la Dra. Ana M. Guerrero Bustos por su asesoramiento en el desarrollo del trabajo. También agradecen a los Ministerios de Educación y Ciencia y al de Fomento las ayudas económicas concedidas a través de los proyectos BIA2005-09250-C03-02, MFOM 2004/9 y MFOM 01/07. Así como al IECA la financiación parcial de los ensayos. Además, agradecen a la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez la ayuda económica a la estancia del Ing. Omar I. Molina Bas en la Universidad Politécnica de Madrid.

REFERENCIAS

- [1] Pihlajavaara, S.E.y.P., H. ; (1975) "On the Correlation between Permeability Properties and Strength of Concrete". *Cement and Concrete Research*, 5, 321 – 328.
- [2] Naik, T.R., Singh, S.S. y Hossain, M.M.; (1994) "Permeability of Concrete Containing Large Amount of Fly Ash". *Cement and Concrete Research*, 24 (5), 913 – 922.
- [3] Koch, G.H., Brongers, M.P.H., Thompson, N.G., Virmani, Y.P., y Payer, J.H. (2002) *Corrosion Costs by Industry Sector*. Supplement to Materials Performance, 4 – 8.
- [4] Materials and Methods for Corrosion Control Reinforced and Prestressed Concrete Structure in New Construction. Smith, J.L.y.V., Y.P.: *US Department of Transportation*.
- [5] Newman J. B. and Owens, P.L.; (2004) "The Use of Beneficiated Fly Ash as a Component of Cement in Concrete". *ACI Materials Journal: Special Publication*, 221, 73 - 90.
- [6] Rasheeduzzafar; (1992) "Influence of Cement Composition on Concrete Durability". *ACI Materials Journal* 89 (6), 574 – 586.
- [7] Davis, R.E., Carlson, R.W., Kelly, J.W., y Davis, H. E.; (1937) "Properties of Cements And Concretes Containing Fly Ash". *ACI Journal Proceedings*, 33 (5), 577 - 612.